

## 变压器

1、变压器有哪些主要部件，它们的主要作用是什么？

答：铁心：构成变压器的磁路,同时又起着器身的骨架作用。

绕组：构成变压器的电路,它是变压器输入和输出电能的电气回路。

分接开关：变压器为了调压而在高压绕组引出分接头,分接开关用以切换分接头,从而实现变压器调压。

油箱和冷却装置：油箱容纳器身,盛变压器油,兼有散热冷却作用。

绝缘套管：变压器绕组引线需借助于绝缘套管与外电路连接，使带电的绕组引线与接地的油箱绝缘。

2、变压器的主磁通和漏磁通之间有哪些主要区别？

答：由于磁通所经路径不同，把磁通分成主磁通和漏磁通，便于分别考虑它们各自的特性，从而把非线性问题和线性问题分别予以处理

区别：

1. 在路径上，主磁通经过铁心磁路闭合，而漏磁通经过非铁磁性物质磁路闭合。
2. 在数量上，主磁通约占总磁通的 99%以上，而漏磁通却不足 1%。
3. 在性质上，主磁通磁路饱和， $\Phi_0$  与  $I_0$  呈非线性关系，而漏磁通磁路不饱和， $\Phi_{10}$  与  $I_1$  呈线性关系。
4. 在作用上，主磁通在二次绕组感应电动势，接上负载就有电能输出，起传递能量的媒介作用，而漏磁通仅在本绕组感应电动势，只起了漏抗压降的作用。

3、变压器的空载电流的性质和作用如何？

答：作用：变压器空载电流的绝大部分用来励磁，即产生主磁通，另有很小一部分用来供给变压器铁心损耗，前者属无功性质，称为空载电流的无功分量，后者属有功性质，称为空载电流的有功分量。

性质：由于变压器空载电流的无功分量总是远远大于有功分量，故空载电流属感性无功性质，它使电网的功率因数降低，输送有功功率减小。

4、变压器空载运行时，是否要从电网取得功率？这些功率属于什么性质？起什么作用？

答：要从电网取得功率，供给变压器本身功率损耗，它转化成热能散逸到周围介质中。小负荷用户使用大容量变压器时，在经济技术两方面都不合理。对电网来说，由于变压器容量大，励磁电流较大，而负荷小，电流负载分量小，使电网功率因数降低，输送有功功率能力下降，对用户来说，投资增大，空载损耗也较大，

变压器效率低。

5、简要说明变压器励磁电抗和漏抗的物理意义。它们分别对应什么磁通，对已制成的变压器，它们是否是常数？当电源电压降低时，它们如何变化？这两个电抗大好还是小好，为什么？

答：励磁电抗对应于主磁通，漏电抗对应于漏磁通，对于制成的变压器，励磁电抗不是常数，它随磁路的饱和程度而变化，漏电抗在频率一定时是常数。

电源电压降至额定值一半时，于是主磁通减小，磁路饱和程度降低，磁导率  $\mu$  增大，磁阻减小，导致电感增大，励磁电抗也增大。但是漏磁通路径是线性磁路，磁导率是常数，因此漏电抗不变。

励磁电抗越大越好，从而可降低空载电流。漏电抗则要根据变压器不同的使用场合来考虑。对于送电变压器，为了限制短路电流和短路时的电磁力，保证设备安全，希望漏电抗较大；对于配电变压器，为了降低电压变化率减小电压波动，保证供电质量，希望漏电抗较小。

励磁电抗对应铁心磁路，其磁导率远远大于漏磁路的磁导率，因此，励磁电抗远大于漏电抗。

6、一台 220/110 V 的单相变压器，如不慎将 220V 电压加在副边侧，会产生什么现象？

答：不慎将 220V 电压加在副边侧，主磁通将增加，磁密将随主磁通的增加而增加，铁心饱和程度增加，磁导率  $\mu$  下降。因为磁阻增大。根据磁路欧姆定律可知，当线圈匝数减少时，励磁电流增大。又由于铁心损耗  $p_{Fe} \propto B_m^2 f^{1.3}$ ，所以铁心损耗增加。

7、如将额定频率为 60 Hz 的变压器，接到 50Hz 的电网上运行，试分析对主磁通、励磁电流、铁耗、漏抗及电压变化率有何影响？

答：电源电压不变，频率从 60Hz 降低到 50Hz 后，下降到原来的 (1/1.2)，主磁通将增大到原来的 1.2 倍，磁密也将增大到原来的 1.2 倍，磁路饱和程度增加，磁导率  $\mu$  降低，磁阻增大。于是，根据磁路欧姆定律  $I_0 N_1 = R_m \Phi_m$  可知，产生该磁通的励磁电流  $I_0$  必将增大。

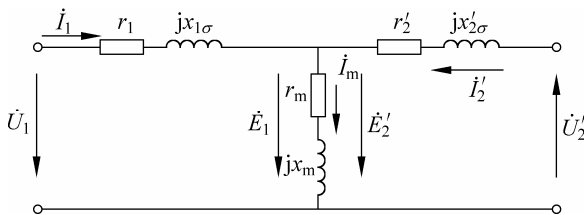
再由  $p_{Fe} \propto B_m^2 f^{1.3}$  讨论铁损耗的变化情况。

$$60\text{Hz 时, } p_{Fe} \propto B_m^2 f^{1.3}, \quad 50\text{Hz 时, } p_{Fe}' \propto (1.2B_m)^2 \left(\frac{1}{1.2}f\right)^{1.3}$$

因为,  $\frac{p_{Fe}}{p_{Fe}'} = \frac{1.2^2}{1.2^{1.3}} = 1.2^{0.7} = 1.14$ , 所以铁损耗增加了。

漏电抗  $x_\sigma = \omega L_\sigma = 2\pi f L_\sigma$ , 因为频率下降, 所以原边漏电抗  $x_{1\sigma}$ , 副边漏电抗  $x_{2\sigma}$  减小。又由电压变化率表达式可知, 电压变化率  $\Delta u$  将随  $x_{1\sigma}$ ,  $x_{2\sigma}$  的减小而减小。

8、试绘出变压器 T 形的等效电路。



$r_1, r_2'$  表示变压器原、副方绕组电阻,  $x_1, x_2'$  表示变压器原、副方绕组漏抗。

$r_m, X_m$  激磁电阻、电抗。

- 9、一台单相变压器,  $S_N=1000\text{kVA}$ ,  $U_{1N}/U_{2N}=60/6.3\text{kV}$ ,  $f_N=50$  赫,
- 空载试验 (低压侧):  $U_0=6300\text{kV}$ 、 $I_0=19.1\text{A}$ 、 $P_0=5000\text{W}$ ;
- 短路试验 (高压侧):  $U_k=3240\text{kV}$ 、 $I_k=15.15\text{A}$ 、 $P_k=14000\text{W}$ ; 试计算:
- (1). 用标么值计算 “T” 形等效电路参数;
  - (2). 满载且  $\cos \varphi_2 = 0.8 (\varphi_2 > 0)$  时的电压变化率及效率;
  - (3). 当  $\cos \varphi_2 = 0.8 (\varphi_2 > 0)$  时的最大效率。

解: (1) 
$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{1000}{60} = 16.67\text{A}$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{1000}{6.3} = 158.73\text{A}$$

$$Z_m^* = \frac{1}{I_0^*} = \frac{1}{I_0 / I_{2N}} = \frac{1}{19.1 / 158.73} = 8.31$$

$$r_m^* = \frac{P_0^*}{(I_0^*)^2} = \frac{P_0 / S_N}{(I_0 / I_{2N})^2} = \frac{5 / 1000}{(19.1 / 158.73)^2} = 0.345$$

$$x_m^* = \sqrt{Z_m^{*2} - r_m^{*2}} = 8.3$$

$$U_{kN} = \frac{U_k I_{1N}}{I_k} = \frac{3240 \times 16.67}{15.15} = 3565V$$

$$P_{kN} = P_K \left( \frac{I_{1N}}{I_k} \right)^2 = 14 \left( \frac{16.67}{15.15} \right)^2 = 16.95kW$$

$$Z_k^* = U_{kN}^* = \frac{U_{kN}}{U_{1N}} = \frac{3565}{60000} = 0.0594$$

$$r_k^* = P_{kN}^* = \frac{P_{kN}}{S_N} = \frac{16.95}{1000} = 0.01695$$

$$x_k^* = \sqrt{Z_k^{*2} - r_k^{*2}} = 0.05693$$

$$r_1^* = r_2^* = \frac{1}{2} r_k^* = 0.0083$$

$$x_1^* = x_2^* = \frac{1}{2} x_k^* = 0.0285$$

(2) 电压变化率为:

$$\Delta u = \beta(r_k^* \cos \varphi_2 + x_k^* \sin \varphi_2) = 1(0.01695 \times 0.8 + 0.05693 \times 0.6) = 0.0478$$

效率

$$\begin{aligned} \eta &= \left( 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{KN}}{\beta S_N \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{KN}} \right) \times 100(\%) \\ &= \left( 1 - \frac{5 + 1^2 \times 16.95}{1 \times 1000 \times 0.8 + 5 + 1^2 \times 16.95} \right) \times 100(\%) = 97.32(\%) \end{aligned}$$

$$\beta_m = \sqrt{\frac{P_0}{P_{KN}}} = \sqrt{\frac{5}{16.95}} = 0.543$$

(3) 最大效率时,负载系数为

最大效率为

$$\begin{aligned} \eta_{\max} &= \left( 1 - \frac{2P_0}{\beta_m S_N \cos \varphi_2 + 2P_0} \right) \times 100(\%) \\ &= \left( 1 - \frac{2 \times 5}{0.543 \times 1000 \times 0.8 + 2 \times 5} \right) \times 100(\%) = 97.75(\%) \end{aligned}$$

10、 三相心式变压器和三相组式变压器相比, 具有会有什么优点? 在测取三相心式变压器空载电流时, 为何中间一相电流小于旁边两相?

答: 三相心式变压器省材料, 效率高, 占地少, 成本低, 运行维护简单, 但它具有下列缺点:

①在电站中, 为了防止因电气设备的损坏而造成停电事故, 往往一相发生事故, 整个变压器都要拆换, 但如果选用三相组式变压器, 一相出了事故只要拆换该相变压器即可, 所以三相心式变压器的备用容量是三相组式变压器的三倍, 增加了电站成本。

②在巨型变压器中，选用三相组式变压器，每个单台变压器的容量只有总容量的三分之一，故重量轻，运输方便。

③由于心式变压器三相磁路不对称，中间铁心柱磁路短，磁阻小，在电压对称时，该相所需励磁电流小。

11、 三相变压器的组别有何意义，如何用时钟法来表示？

答：三相变压器的连接组别用来反映三相变压器对称运行时，高、低压侧对应的线电动势（线电压）之间的相位关系。影响组别的因素不仅有绕组的绕向、首末端标记，还有高、低压侧三相绕组的连接方式。

用时钟法表示时，把高压绕组的线电动势（线电压）相量作为时钟的长针，并固定在 12 点，低压绕组的线电动势（线电压）相量作为短针，其所指的数字即为三相变压器的连接组别号。三相变压器共有 12 种组别，其中有 6 种单数组别和 6 种偶数组别。

12、试分析为什么三相组式变压器不能采用 Y/Y0 接线，而小容量的三相心式变压器却可以？

答：三相组式变压器由于三相磁路彼此独立，有三次谐波磁通通路。如果采用 Y, y 接线，三次谐波电流将不能流通，电流为正弦波，由于磁路具有饱和特性，主磁通是平顶波，其中含有较大的三次谐波磁通，相绕组将感应较大的三次谐波电动势，它与基波电动势叠加使相电动势呈尖顶波形，绕组承受过电压，从而危及绝缘。如果采用 Y, yn 接线，负载时二次侧可以为三次谐波电流提供通路，但由于受到负载阻抗的影响，三次谐波电流不可能大，因而对主磁通波形的改善甚微，也就不能改善电动势波形。

心式变压器由于磁路彼此不独立，没有三次谐波磁通通路，三次谐波磁通只能从铁轭中散发出去，经由变压器油及油箱壁构成回路，因磁阻很大，三次谐波磁通很小，因此主磁通近似为正弦波形，相电动势波形也就基本为正弦波。但是由于三次谐波磁通频率为基波频率的 3 倍，将在经过的箱壁及其它结构件中产生较大的涡流损耗，引起局部过热，并降低变压器效率，因此这两种接线只适用于小容量的三相心式变压器。

13、一台单相变压器， $S_N=100\text{KVA}$ ， $U_{N1}/U_{N2}=60/6.3\text{KV}$ ，在低压侧做空载实验测得  $P_0=1.5\text{KW}$ ，测得电流为 15.87A。在高压侧做短路实验测得  $U_K=3240\text{V}$ ， $P_K=3.0\text{KW}$ 。求：满载时且  $\cos \phi_2=0.8$ （滞后）时的效率？二次侧电压？最大效率？

$$(1) I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{100000}{60000} = 1.667(A)$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{100000}{6300} = 15.87 A$$

$$Z_m = \frac{U_0}{I_0} = \frac{U_{2N}}{I_0} = \frac{6300}{15.87} = 396.98(\Omega)$$

$$r_m = \frac{p_0}{I_0^2} = \frac{1500}{15.87^2} = 5.95(\Omega)$$

$$x_m = \sqrt{396.98^2 - 5.95^2} = 396.93(\Omega)$$

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{U_k}{I_{1N}} = \frac{3240}{1.667} = 1943.6(\Omega)$$

$$r_k = \frac{P_k}{I_k^2} = \frac{3000}{1.667^2} = 1079.57(\Omega)$$

$$x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{1943.6^2 - 1079.57^2} = 1616.2(\Omega)$$

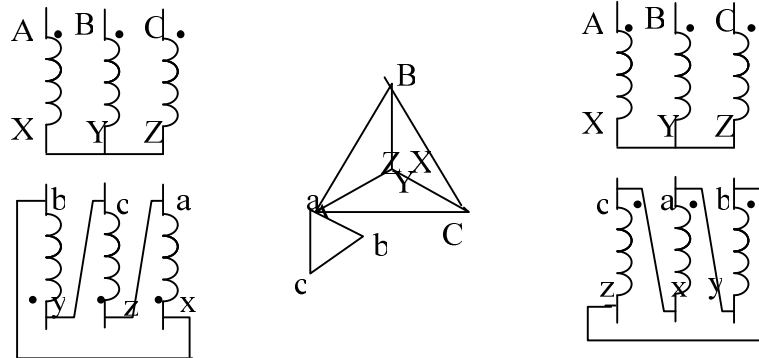
$$(2) \Delta U = \frac{I_{1N}(r_k \cos \varphi_2 + x_k \sin \varphi_2)}{U_{1N}} = \frac{1.667 \times (1079.57 \times 0.8 + 1616.2 \times 0.6)}{60000} = 0.0509$$

$$U_2 = U_{2N}(1 - \Delta U) = 5979.1V$$

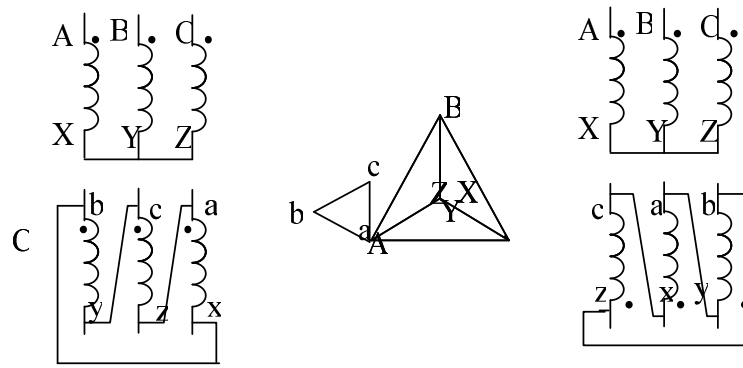
$$(3) \eta = \left( 1 - \frac{p_0 + p_k}{S_N \cos \varphi_2 + p_0 + p_k} \right) = \left( 1 - \frac{1500 + 3000}{100000 \times 0.8 + 1500 + 3000} \right) = 0.947$$

14、试画出 Y/d-3、Y/d-9 连接组的绕组接线图。

Y/d-3



Y/d-9



15、一台 5KVA，480V/120V 的普通双绕组变压器，改接成 600V/480V 的自耦变压器。求改接后的一次、二次侧的额定电流和变压器容量。

$$K_A = \frac{U_{1aN}}{U_{2aN}} = \frac{600}{480} = 1.25$$

$$s_{aN} = \frac{K_A}{(K_A - 1)} s_N = 25 \text{ KW}$$

$$I_{1N} = -\frac{s_{aN}}{U_{1aN}} = \frac{25000}{600} = 41.6 \text{ A}$$

$$I_{1N} = -\frac{s_{aN}}{U_{2aN}} = \frac{25000}{480} = 52.1 \text{ A}$$

### 三相交流异步电动机

1、 三相异步电动机旋转磁场产生的条件是什么？旋转磁场有什么特点？其转向取决于什么？其转速的大小与哪些因素有关？

答：三相异步电动机旋转磁场产生的条件是：三相对称绕组通以三相对称电流；其转向取决于三相的相序；其转速  $n_1=60f/p$ ；异步电动机转子转速总是小于同步转速；其转差范围  $0 < s < 1$ 。

2、 试比较单相交流绕组与三相交流绕组所产生的磁势有何区别？与直流绕组磁势又有何区别？

答：单相交流绕组产生的磁势为脉振磁势，三相交流绕组产生的磁势为旋转磁势。脉振磁势在空间的位置是固定的，而大小随时间变化；旋转磁势的幅值不变，但在空间随时间而旋转。而直流绕组产生的磁势不仅在空间的位置固定不变，且其大小也不随时间变化，为恒定磁势。

3 、 有一台三相异步电动机， $2P=2$ ， $n=3000$  转/分， $Z=60$ ，每相串联总匝数  $N=20$ ， $f_N=50$  赫，每极气隙基波磁通  $\Phi_1=1.505$  韦，求：

(1) 基波电动势频率、整距时基波的绕组系数和相电动势；

(2) 如要消除 5 次谐波，节距  $y$  应选多大，此时的基波电动势为多大？

解：(1) 基波电动势频率 
$$f = \frac{pn}{60} = \frac{1 \times 3000}{60} = 50 \text{ Hz}$$

极距 
$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{60}{2} = 30$$

每极每相槽数 
$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{60}{2 \times 3} = 10$$

槽距角 
$$\alpha_1 = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{1 \times 360^\circ}{60} = 6^\circ$$

整距绕组基波短距系数 
$$K_{y1} = 1$$

基波分布系数 
$$K_{q1} = \frac{\sin \frac{q\alpha_1}{2}}{q \sin \frac{\alpha_1}{2}} = \frac{\sin \frac{10 \times 6^\circ}{2}}{10 \times \sin \frac{6^\circ}{2}} = 0.9553$$

基波绕组系数 
$$K_{w1} = K_{y1} K_{q1} = 1 \times 0.9553 = 0.9553$$

基波相电动势 
$$\begin{aligned} E_{\Phi 1} &= 4.44 f N K_{w1} \Phi_1 \\ &= 4.44 \times 50 \times 20 \times 0.9553 \times 1.505 \\ &= 6383.5 \text{ V} \end{aligned}$$



$$(2) \text{ 取 } y = \frac{\nu-1}{\nu} \tau = \frac{5-1}{5} \tau = \frac{4}{5} \tau$$

$$\text{用空间电角度表示节距 } \gamma_1 = y\alpha_1 = \frac{4}{5} \times 180^\circ = 144^\circ$$

$$\text{基波短距系数 } K_{y1} = \sin \frac{\gamma_1}{2} = \sin \frac{144^\circ}{2} = 0.951$$

$$\begin{aligned} E_{\Phi 1} &= 4.44 f N K_{y1} K_{q1} \Phi_1 \\ &= 4.44 \times 50 \times 20 \times 0.951 \times 0.9553 \times 1.505 \\ &= 6070.7V \end{aligned}$$

基波相电动势

4、 异步电动机与同容量变压器相比，哪一个空载电流大？为什么？

答：异步电动机空载电流大，在容量和电压相同的情况下，异步电动机和变压器的

的主磁通  $\Phi_0$  基本相同，又由磁路欧姆定律知：  $\Phi_m = \frac{I_0 N_1}{R_m}$ ，其  $I_0 \propto R_m$ （匝数  $N_1$  的影响远不及  $R_m$ ），由于异步电动机主磁通磁路中有两个气隙，而变压器是纯铁心磁路，故异步电动机主磁通磁路的磁阻远较变压器大，故其空载电流远较变压器大。

5、 比较变压器折算与异步电动机折算的异同之处？异步电动机等效电路中的附

加电阻  $\frac{1-s}{s} r_2'$  的物理意义是什么？能否用电感或电容来代替，为什么？

两者的相同之处：

(1) 目的相同。都是想将两个没有直接电联结的电路用一个电路来等效。

(2) 折算原则相同。即折算前后功率、能量不变；向量方向不变。

(3) 得到的等值电路形式基本相同。

两者的不同之处在于变压器的折算只有绕组折算，而异步电动机的折算不仅有绕组折算，还需进行频率折算。

答：异步电动机等效电路中的附加电阻实为代表机械负载（严格地说还包括机械损耗等）的一个虚拟电阻，用转子电流在该电阻所消耗的功率  $I_2'^2 \frac{1-s}{s} r_2'$  来等效代替总机械功率（包括轴上输出的机械功率和机械损耗等）。

因输出的机械功率及机械损耗等均属有功性质，因此，从电路角度来模拟的话，只能用有功元件电阻，而不能用无功元件电感或电容来等效代替。

6、 一台六极异步电动机，额定功率  $P_N=28$  千瓦， $U_N=380$  伏， $f_1=50\text{Hz}$ ， $n_N=950$  转/分，额定负载时， $\cos\varphi_1=0.88$ ， $p_{cu1}+p_{Fe}=2.2$  千瓦， $p_{mec}=1.1$  千瓦， $p_{ad}=0$ ，计算在额定时的  $s_N$ 、 $p_{cu2}$ 、 $\eta_N$ 、 $I_1$  和  $f_2$ 。

解：磁极对数：
$$n_N \approx n_1 = \frac{60f}{p}$$

$$p \approx \frac{60f}{n_N} = \frac{60 \times 50}{950} 3.16 \quad \text{取 } p = 3$$

同步转速：
$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{3} = 1000 \text{ r/min}$$

额定转差率：
$$s_N = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1000 - 950}{1000} = 0.05$$

总机械功率：
$$P_{mec} = P_N + p_{mec} = 28 + 1.1 = 29.1 \text{ kW}$$

转子铜损：
$$\frac{p_{cu2}}{P_{mec}} = \frac{s_N}{1 - s_N}$$

$$p_{cu2} = \frac{s_N}{1 - s_N} P_{mec} = \frac{0.05}{1 - 0.05} \times 29.1 = 1.532 \text{ kW}$$

输入功率：

$$P_1 = P_N + p_{mec} + p_{cu2} + p_{Fe} + p_{cu1} = 28 + 1.1 + 1.532 + 2.2 = 32.832 \text{ kW}$$

效率：
$$\eta = \frac{P_N}{P_1} 100\% = \frac{28}{32.832} 100\% = 85.3\%$$

定子电流：
$$I_{1N} = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_N \cos\varphi_1} = \frac{32.832}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.88} = 56.68 \text{ A}$$

转子电动势频率：
$$f_2 = s_N f_1 = 0.05 \times 50 = 2.5 \text{ Hz}$$

7、 一台 4 极异步电动机，额定功率  $P_N=5.5$  千瓦， $f_1=50\text{Hz}$ ，在某运行情况下，自定子方面输入的功率为 6.32 千瓦， $p_{cu1}=341$  瓦， $p_{cu2}=237.5$  瓦， $p_{Fe}=167.5$  瓦， $p_{mec}=45$  瓦， $p_{ad}=29$  瓦，并计算在该运行情况下的效率、转差率、转速及空载转矩、输出转矩和电磁转矩。

解：输出功率：

$$\begin{aligned} P_2 &= P_1 - (p_{ad} + p_{mec} + p_{cu2} + p_{Fe} + p_{cu1}) \\ &= 6.32 - (0.029 + 0.045 + 0.2375 + 0.1675 + 0.341) = 5.5 \text{ kW} \end{aligned}$$

效率：
$$\eta = \frac{P_N}{P_1} 100\% = \frac{5.5}{6.32} 100\% = 87.03\%$$

电磁功率:

$$P_{em} = P_2 + p_{ad} + p_{mec} + p_{cu2} = 5.5 + 0.029 + 0.045 + 0.2375 = 5.8115 kW$$

$$\text{转差率: } s = \frac{p_{cu2}}{P_{em}} = \frac{0.2375}{5.8115} = 0.041$$

$$\text{转速: } n = (1-s)n_1 = (1-0.041) \frac{60f_1}{p} = (1-0.041) \frac{60 \times 50}{2} = 1438.5 r/min$$

$$\text{空载损耗: } p_0 = p_{mec} + p_{ad} = 0.045 + 0.029 = 0.074 kW$$

$$\text{空载转矩: } T_0 = 9550 \frac{p_0}{n} = 9550 \frac{0.074}{1438.5} = 0.49 Nm$$

$$\text{输出转矩: } T_2 = 9550 \frac{P_2}{n} = 9550 \frac{5.5}{1438.5} = 36.51 Nm$$

$$\text{电磁转矩: } T_{em} = 9550 \frac{P_{em}}{n_1} = 9550 \frac{5.8115}{1500} = 37 Nm$$

$$\text{或 } T_{em} = T_2 + T_0 = 36.51 + 0.49 = 37 Nm$$

8、一台鼠笼异步电动机，原来转子是铜条，后因损坏改成铸铝，如输出同样功

率，在通常情况下， $s_N$ 、 $\cos \varphi_1$ 、 $\eta_1$ 、 $I_{1N}$ 、 $s_m$ 、 $T_{max}$ 、 $T_{st}$  有何变化？

答：铝的电阻率比铜大，故转子由铜条改为铝条，实为增加转子绕组电阻  $r_2$ 。

(1)  $s_N$  增大

(2)  $\cos \varphi_1$  不变，因转子电阻改变不影响电机从电网吸取的励磁功率，故无功功率不变，由于输出功率不变，则电机从电网吸取的有功功率基本不变，忽略电机损耗，所以  $\cos \varphi_1$  基本不变。

(3)  $\eta_N$  下降，由于转差率  $s$  增大，故转子铜损  $p_{cu2} = sP_{em}$  增加， $I_1$  稍有增大，故定子铜损也稍大，而铁损不变，机械损耗  $p_{mec}$  因  $s$  增大  $n$  减小而稍有减小，但其减小幅度不及转子绕组铜损增大幅度，故总损耗增加，效率降低。

(4)  $I_{1N}$  有所增大： $P_2 = \sqrt{3}U_{1N}I_{1N} \cos \varphi_N \eta_N$ ，因  $P_2$  不变， $\cos \varphi_N$  不变， $\eta_N$  下降，故  $I_{1N}$  有所增大。

(5)  $s_m$  增大，因为  $s_m \propto r_2'$ 。

(6)  $T_{max}$  不变，因为  $T_{max}$  与  $r_2'$  无关。

(7)  $T_{st}$  增大，因为  $T_{st} \propto r_2'$ 。

### 三相异步电动机的电力拖动

1、普通鼠笼异步电动机在额定电压下起动，为什么起动电流很大，而起动转矩却不大？

答：(1)从电磁关系看，起动初瞬， $n=0$ ，定子旋转磁场对静止转子的相对切割速度最高( $n_1$ )，故转子感应电动势最大。此时尽管转子电动势频率以及它所对应的漏抗也大，但由于受转子槽形的影响，在起动瞬间槽口处饱和，致使漏抗增加幅度较电动势小，而转子绕组电阻又近为不变，故起动时转子电流

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2'^2}} \text{ 增大, 根据磁动势平衡关系, 此时定子电流(即起动电流)就大(约为额定电流 5-7 倍)。$$

从等效电路看，起动初瞬， $n=0$ ， $s=1$ ，附加电阻  $\frac{1-s}{s}r_2' = 0$ ，相当于短路运行状态，此时起动电流：

$$I_{st} = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2}}$$

由于定，转子绕组的漏阻抗即很小，故起动电流很大。

$$(2) T_{em} = C_T \Phi_0 I_2' \cos \psi_2$$

其一：转子电流  $I_2'$  尽管大，但由于起动初瞬间， $x_2$  增大而  $r_2$  不变，故功率因数角  $\psi_2 = \arctan \frac{x_2}{r_2}$  大，功率因数  $\cos \psi_2$  就很低，所以这时转子电流有功分量  $I_2' \cos \psi_2$  却不大(因为说起动瞬间转子电流大的是无功分量电流)。其二，由于起动电流大，定子绕组漏阻抗压增大，由于  $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{st} Z_1$  知，此时定子绕组的

感应电动势  $E_1$  较小，故而  $\Phi_0 = \frac{E_1}{4.44 f_1 N_1 K_{w1}}$  小，基于此两原因，所以异步电动机起动转矩就不大。

2、在应用降压起动来限制异步电动机起动电流时，起动转矩受到什么影响，比较各种降压的起动方法，着重指出起动电流倍数和起动转矩倍数间的关系。

答：由上题式知： $I_{st} \propto U_1$ ，而  $T_{st} \propto U_1^2$ ，故采用降压起动限制起动电流的同时，更限制了起动转矩，因此此法只适用于空载或轻载时起动。

$I_{st}$ 、 $T_{st}$  被限制情况列表如下：

全压起动		$I_{st}$	$T_{st}$
降压起动	定子串电抗器起动 *1	$I_{st} / K$	$T_{st} / k^2$

	Y-△换接起动* <sup>2</sup>	$I_{st}/k^2$	$T_{st}/k^2$
	自耦补偿器起动	$I_{st}/k^2$	$T_{st}/k^2$

\*<sup>1</sup> 设  $K$  为电压降低倍数 ( $K = \frac{U_N}{U_1'}$ )      \*<sup>2</sup> Y-△换接起动中  $K = \sqrt{3}$ 。

定子串电抗器起动的起动电流仅限制了  $K$  倍 (其它为  $K^2$  倍), 但  $K$  值可根据要求灵活选择。

Y-△换接起动只适用于有六个引出端头的角接线的异步电动机, 其  $K$  固定为  $\sqrt{3}$ , 故无选择灵活性, 但其起动设备价廉。

自耦补偿器起动, 有三个  $K$  值, 可供选择, 它对电动机定子绕线无任何要求, 起动转矩比 Y-△换接大, 但设备费用较贵。

3、双鼠笼异步电动机两笼之间为什么一定要有缝隙? 深槽式异步电动机转子槽为什么要做得深而窄?

答: 磁通总是以磁阻小的路径闭合, 双鼠笼电动机两笼间的缝隙主要是迫使上笼漏磁通路径也交链于下笼 (因缝隙的磁阻大), 这样交链于下笼的漏磁通比上笼多, 下笼就有较大的漏抗, 使趋表效应更为明显。

深槽式异步电动机转子槽之所以做得深而窄, 主要是为了改变转子的漏磁通的分布, 从而改变其参数。槽越深, 交链槽底部的漏磁通就越多, 这些漏磁通所经过的截面积就越大, 磁阻越小, 漏抗就越大。另外槽窄, 漏磁通经过槽内部分的长度越短, 磁阻越小, 故漏抗也越大, 因此槽深而窄的结果, 均增加槽底部分漏抗, 使趋表效应更为明显。

4、一台绕线式异步电动机  $P_N=30KW$ ,  $U_N=380V$ ,  $n_N=720r/min$ ,  $I_N=71.6A$ ,  $E_{2N}=272V$ ,  $I_{2N}=75A$ ,  $\lambda_M=2.0$ 。求

- (1) 额定转差率;
- (2) 临界转差率;
- (3) 用工程实用公式求起动转矩。

解: (1)  $n_N=720r/min$        $n_1=750 r/min$        $s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{750 - 720}{750} = 0.04$

(2)  $s_m = s_N (\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}) = 0.04 \times (2 + \sqrt{2^2 - 1}) = 0.15$

(3) 根据工程实用公式:

$$\frac{T}{T_{\max}} = \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} \quad \frac{T_{st}}{T_{\max}} = \frac{2}{\frac{1}{s_m} + \frac{s_m}{1}}$$

$$T_{\max} = \lambda_M T_N = \lambda_M \frac{P_N}{\Omega} = 2 \times \frac{30000}{2\pi \times 720/60} = 796 \text{ N m}$$

$$T_{st} = \frac{T_{\max}}{\frac{1}{s_m} + \frac{s_m}{1}} = \frac{796}{1/0.15 + 0.15} = 234 \text{ N m}$$

5、当三相异步电动机在额定负载下运行时，由于某种原因，电源电压降低了20%，问此时通入电动机定于绕组中的电流是增大还是减小？为什么？对电动机将带来什么影响？

答：当电压下降过多，则电磁转矩下降更多，当最大电磁转矩  $T_m < T_L$ ，则电动机就停转，定、转子电流急速增大，若无保护，则绕组会因过热而烧毁。

最大转矩下降，因为  $T_m \propto U_1^2$ ；起动转矩下降，因为  $T_{st} \propto U_1^2$ ； $\Phi_0$  减小，因为

$$\Phi_0 \approx \frac{U_1}{4.44 f_1 N_1 K_{w1}}, \quad \Phi_0 \propto U_1; \quad S \text{ 增大，由于 } U_1 \text{ 下降瞬间，} T_{em} \text{ 减小，导致转速}$$

下降；效率  $\eta$  降低，电压  $U_1$  下降，铁损减小，但此时  $I_1$ 、 $I_2$  增大，定、转子铜损增大，其增加的幅度远大于铁损减小幅度，故效率下降。

6、三相异步电动机起动时，如电源一相断线，这时电动机能否起动，如绕组一相断线，这时电动机能否起动？Y、 $\Delta$ 接线是否一样？如果运行中电源或绕组一相断线，能否继续旋转，有何不良后果？

答：电源一相断线，电动机无论是Y接线或 $\Delta$ 接线，均成为单相运行，就相当于一台单相异步电动机，它产生脉动磁动势，而脉动磁动势可分解成大小相等、转速相同、转向相反的两个旋转磁动势，由于起动初瞬，转子是静止的，两个旋转磁动势以相同的速率截切转子绕组，产生相应的感应电动势、电流和电磁转矩，显然两个转矩大小相等、方向相反，其合成总转矩为零，故无起动转矩，电动机不能起动。

如果绕组一相断线，对Y接电动机仍为单相运行，故也不能起动。而 $\Delta$ 接线电动机却成为两相运行，它产生旋转磁动势，旋转磁动势有起动转矩，故能起动。

如果运行中电源或绕组一相断线，即使成单相运行，电动机仍能按原方向旋转（只要此时的电磁转矩仍大于负载转矩），因为这时两个旋转磁动势中必有一

个与原来转向相同，它对转子的转差率为  $s^+ = \frac{n_1 - n}{n_1} < 1$ ，而另一个  $s^- = \frac{-n_1 - n}{-n_1} > 1$ ，由于  $s^+ < s^-$ ，因此由相反方向旋转磁动势所产生的有功分量电流  $I_2' \cos \psi_2$  很小（漏抗  $x_{2s} = sx_2$  所致），这使它所产生的电磁转矩  $T_{em}^-$  减小，则  $T_{em}^+ > T_{em}^-$ ，结果转子总转矩减小，若它仍大于负载转矩，则转子就沿原方向旋转。

上述各种情况，对电机都不利，若成单相运行，无法起动，呈堵转状态，电流急剧增大而会烧坏绕组。若运行中缺相，电机虽能继续旋转（若此时电磁转矩仍大于负载转矩），由于反向电磁转矩作用的结果，使总转矩减小（出力减小），若负载转矩不变，电机就处于过载状态，绕组过热，时间长同样会烧毁绕组。

7、某三相笼型异步电动机额定数据如下： $P_N = 300\text{KW}$ ， $n_N = 1450\text{r/min}$ ， $U_N = 380\text{V}$ ， $I_N = 527\text{A}$ ，起动电流倍数  $K_I = 6.7$ ，起动转矩倍数  $K_{st} = 1.5$ ，过载能力  $\lambda_m = 2.5$ ，定子  $\Delta$  接法。试求：① 直接起动时电流  $I_{st}$  和转矩  $T_{st}$ 。② 如果供电电源允许的最大冲击电流为  $1800\text{A}$ ，采用定子串对称电抗器起动，求所得电抗值  $X_{st}$  及起动转矩  $T_{st}$ 。③ 如果采用  $Y/\Delta$  起动，能带动  $1000\text{N.m}$  的恒转矩负载起动吗？为什么？④ 为使起动时最大冲击电流不超过  $1800\text{A}$ ，而且起动转矩不小于  $1000\text{N.m}$ ，采用自耦变压器减压起动，已知自耦变压器的抽头分别为  $55\%$ 、 $65\%$ 、 $73\%$  三档，试问应取哪一档抽头电压？为什么？在所取的这一档抽头电压下起动时的起动转矩及对电网的起动电流各为多少？

$$I_{st} = k_I I_N = 3530.9\text{A}$$

$$\text{解：① } T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 1975.86\text{A}$$

$$T_{st} = k_{st} T_N = 2963.8\text{NM}$$

$$\text{③ } T_{st}' = \frac{1}{3} T_{st} = \frac{1}{3} k_{st} T_N = 987.93\text{NM} < 1000\text{NM}$$

所以不能带动  $1000\text{N.m}$  的恒转矩负载起动。

$$I_1 = \frac{U_X}{U_N} I_{st}$$

④ 采用自耦变压器减压起动，

$$T_x = \left(\frac{U_X}{U_N}\right)^2 T_{st}$$

$$I_1 = \frac{U_X}{U_N} I_{st} = 0.55 \times 3530.9 = 1068.10 A < 1800 A$$

抽头分别为 55%

$$T_x = \left(\frac{U_X}{U_N}\right)^2 T_{st} = (0.55)^2 \times 2963.8 = 896.55 < 1000 NM$$

不可采用。

$$I_1 = \frac{U_X}{U_N} I_{st} = 0.65 \times 3530.9 = 1446.26 A < 1800 A$$

抽头分别为 65%

$$T_x = \left(\frac{U_X}{U_N}\right)^2 T_{st} = (0.65)^2 \times 2963.8 = 1213.97 > 1000 NM$$

可采用。

$$I_1 = \frac{U_X}{U_N} I_{st} = 0.73 \times 3530.9 = 1881.52 A > 1800 A$$

抽头分别为 73%

$$T_x = \left(\frac{U_X}{U_N}\right)^2 T_{st} = (0.73)^2 \times 2963.8 = 1579.4 > 1000 NM$$

不可采用。

8、 什么叫三相异步电动机的调速？对三相笼型异步电动机，有哪几种调速方法？并分别比较其优缺点。三相绕线转子异步电动机通常用什么方法调速？

答： 异步电动机调速方法主要有：（1）变极调速、（2）变频调速（3）变转差调速（包括变压调速、转子回路串电阻调速），前二种用于鼠笼异步电动机的调速，后一种为绕线式异步电动机的调速。

变极调速：通过改变定子半相绕组的电流方向可以实现极对数的改变，Y/YY接变极调速属于恒转矩调速方式， $\Delta$  /YY 接变极调速属于近似恒功率调速方式。

变频调速特点：基频以下为恒转矩调速；基频以上为恒功率调速；变频调速过程中，异步电动机机械特性的硬度保持不变，调速范围宽；频率连续可调，可以实现无级调速。

其中变极调速、变转差调速两种不能在宽广范围内调速，而变频调速即使有较大范围调速，因其成本高，由于经济上的原因，异步电动机不适用于需要在较宽的范围内调速的场合（在这种场合下，采用直流电动机更为适宜）。

三相绕线转子异步电动机通常用转子回路串电阻调速调速。

9、何谓异步电动机制动。制动方法有哪几种，各具有什么特点。简述之。

答：所谓异步电动机制动是指电磁转矩与转速方向相反的一种运行状态。

制动方法有能耗制动、反接制动、回馈制动。



三相异步电动机能耗制动时，需对提供额外的励磁电源。将所要制动异步电动机的定子绕组迅速从电网上断开，同时将其切换至直流电源上。通过给定子绕组加入直流励磁电流建立恒定磁场。于是，旋转的转子和恒定磁场之间相互作用，便产生具有制动性的电磁转矩。由于制动过程中，大部分动能或势能均转变为电能消耗在转子回路的电阻上。

反接制动是一种通过改变外加三相交流电源的相序或在外部条件下转速反向，引起电磁转矩与转速反向的制动状态。

反接制动分两种情况，转速反向的反接制动和定子相序改变的反接制动。三相异步电动机既从转子轴上输入机械功率，又从电网上吸收电磁功率，这两部分功率最终通过转子回路中的电阻消耗掉。

回馈制动是指三相异步电动机转子实际转速超过同步速的一种制动状态。在回馈制动过程中，电机轴上输入的机械势能被转换为电能，并由转子传递到定子侧。

10、某三相八极绕线式异步电动机， $P_N=60\text{kW}$ ， $U_N=380\text{V}$ ， $n_N=720\text{转/分}$ ，过载能力 $k_m=2$ ，转子每相电阻 $r_2=0.02\ \Omega$ ，该电机用于起重机且重物产生的负载转矩为 $0.8T_N$ ，在忽略空载制动转矩的情况下，试求：

- (1) 如果要求以 $200\text{r/min}$ 提升重物，则转子回路每相应串入多大电阻？
- (2) 以 $150\text{转/分}$ 下放重物，转子每相应串入多大电阻？
- (3) 若使重物停在空中，转子每相应串入多大电阻？

$$n_2 = 200\text{r/min}$$

$$(1) \quad s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{750 - 720}{750} = 0.04$$

$$s_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{750 - 200}{750} = 0.733$$

$$s_m = s_N (\lambda_m + \sqrt{(\lambda_m)^2 - 1}) = 0.04 \times (2 + \sqrt{2^2 - 1}) = 0.1493$$

$$s'_m = s_2 \left( \frac{\lambda_M T_N}{T_L} + \sqrt{\left( \frac{\lambda_M T_N}{T_L} \right)^2 - 1} \right) = 0.733 \times \left( \frac{2 \times T_N}{0.8 \times T_N} + \sqrt{\left( \frac{2 \times T_N}{0.8 \times T_N} \right)^2 - 1} \right) = 3.512$$

$$\frac{r_2}{s_m} = \frac{r_2 + r_{ad}}{s'_m}$$

$$r_{ad} = \left( \frac{s'_m}{s_m} - 1 \right) r_2 = \left( \frac{3.512}{0.1493} - 1 \right) \times 0.02 = 0.45 \Omega$$

$$(2) \quad s_3 = \frac{n_1 - n_3}{n_1} = \frac{750 - (-150)}{750} = 1.2$$

$$s'_m = s_3 \left( \frac{\lambda_M T_N}{T_L} + \sqrt{\left( \frac{\lambda_M T_N}{T_L} \right)^2 - 1} \right) = 1.2 \times \left( \frac{2 \times T_N}{0.8 \times T_N} + \sqrt{\left( \frac{2 \times T_N}{0.8 \times T_N} \right)^2 - 1} \right) = 5.75$$

$$\frac{r_2}{s_m} = \frac{r_2 + r_{ad3}}{s''_m}$$

$$r_{ad} = \left( \frac{s''_m}{s_m} - 1 \right) r_2 = \left( \frac{5.75}{0.1493} - 1 \right) \times 0.02 = 0.75 \Omega$$

$$(3) \quad s_4 = 1$$

$$s''_m = s_4 \left( \frac{\lambda_M T_N}{T_L} + \sqrt{\left( \frac{\lambda_M T_N}{T_L} \right)^2 - 1} \right) = 1 \left( \frac{2 \times T_N}{0.8 \times T_N} + \sqrt{\left( \frac{2 \times T_N}{0.8 \times T_N} \right)^2 - 1} \right) = 4.79$$

$$\frac{r_2}{s_m} = \frac{r_2 + r_{ad3}}{s'''_m}$$

$$r_{ad} = \left( \frac{s'''_m}{s_m} - 1 \right) r_2 = \left( \frac{4.79}{0.1493} - 1 \right) \times 0.02 = 0.622 \Omega$$

11、某三相绕线转子异步电动机额定数据如下： $P_N=60\text{KW}$ ， $U_{N1}=380\text{V}$ ， $I_N=133\text{A}$ ， $n_N=577\text{r/min}$ ， $E_{2N}=253\text{V}$ ， $I_{2N}=160\text{A}$ ， $\lambda_m=2.5$ ，定、转子绕组都为Y接法，求：①采用电阻倒拉反接制动，使位能负载  $T_L=0.8T_N$ ，以  $n=150\text{r/min}$  的速度稳速下放，应在转子每相串入多大的电阻  $r_{ad}$ ？②该电动机在额定运行时突然将定子电源对调，要求制动瞬时的制动转矩为  $1.2T_N$ ，应在转子每相串入多大电阻  $r_{ad}$ ？现采用回馈制动并在转子回路中串入电阻  $r_{2ad} = 0.05 \Omega$ ，而使位能负载  $T_N=0.8T_N$  稳速下放，试求下放转速。

$$\text{解：} (1) \quad s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{600 - 577}{600} = 0.0383$$

$$s_m = s_N (\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}) = 0.0383 \times (2.5 + \sqrt{2.5^2 - 1}) = 0.1835$$

$$r_2 = \frac{s_N E_{2N}}{\sqrt{3} I_{2N}} = \frac{0.0383 \times 253}{\sqrt{3} \times 160} = 0.035 \Omega$$

$$s' = \frac{T_L}{T_N} s_N = 0.03064$$

$$n' = (1 - s') n_1 = 582 \text{ r / min}$$

$$s'' = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{600 - (-150)}{600} = 1.25$$

$$r_{ad1} = (\frac{s''}{s'} - 1) r_2 = (\frac{1.25}{0.0364} - 1) \times 0.035 = 1.17 \Omega$$

$$s''' = \frac{-n_1 - n}{-n_1} = \frac{-600 - 582}{-600} = 1.97$$

$$s_m''' = s''' (\frac{\lambda_M T_N}{T_L} + \sqrt{(\frac{\lambda_M T_N}{T_L})^2 - 1}) = 7.7$$

$$r_{ad2} = (\frac{s_m'''}{s_m} - 1) r_2 = 1.433 \Omega$$

12、某三相笼型异步电动机技术数据为：P<sub>N</sub>=11KW，U<sub>N</sub>=380V，I<sub>N</sub>=21.8A，n<sub>N</sub>=2930r/min，λ<sub>m</sub>=2.2，拖动 T<sub>L</sub>=0.8T<sub>N</sub> 的恒转矩负载运行，求：

- (1) 电动机的转速。
- (2) 若降低电源电压到 0.8U<sub>N</sub> 时的转速。
- (3) 若降低频率到 0.8f<sub>N</sub>=40Hz，保持 E<sub>1</sub>/f<sub>1</sub> 不变时电动机的转速。

$$\text{解：(1) } s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{3000 - 2930}{3000} = 0.0233$$

$$s_m = s_N (\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}) = 0.0233 \times (2.2 + \sqrt{2.2^2 - 1}) = 0.0969$$

$$\frac{0.8T_N}{\lambda_M T_N} = \frac{2}{\frac{s_1}{sm} + \frac{sm}{s_1}}$$

$$s_1 = 0.01864$$

$$n' = (1 - s_1)n_1 = 2944r / \text{min}$$

$$(2) \quad T_m' = 0.8^2 \times \lambda_M \times T_N = 1.408T_N$$

$$\frac{0.8T_N}{T_m'} = \frac{2}{\frac{s_2}{sm} + \frac{sm}{s_2}}$$

$$s_2 = 0.0275$$

$$n' = (1 - s_2)n_1 = 2917r / \text{min}$$

$$\Delta n = 3000 - 2944 = 56r / \text{min}$$

$$(3) \quad n_1' = 0.8n_1 = 0.8 \times 3000 = 2400r / \text{min}$$

$$n' = n_1' - \Delta n = 2400 - 56 = 2344r / \text{min}$$

## 单相异步电动机和同步电动机

### 思考题与习题

1、为什么大容量同步电机采用磁极旋转式而不用电枢旋转式？

答 由于励磁绕组电流相对较小，电压低，放在转子上引出较方便。电枢绕组电压高、容量大，放在转子上使结构复杂、引出不方便。故大容量电机将电枢绕组作为定子，磁极作为转子，为旋转磁极式。

2、为什么同步电机的气隙要比容量相同的感应电机的大？

答 感应电机的励磁电流由电源供给，需要从电网吸取感性无功功率，如果气隙大，则励磁电流大，电机的功率因数低，因此在机械允许的条件下，气隙要尽量小一些。同步电机的气隙磁场由转子电流和定子电流共同激励，从同步电机运行稳定性考虑，气隙大，同步电抗小，短路比大，运行稳定性高。但气隙大，转子用铜量增大，制造成本增加。气隙大小的选择要综合考虑运行性能和制造成本这两方面的要求。

3、同步发电机电枢反应性质由什么决定？

答 电枢磁动势的基波与励磁磁动势同转速、同转向，在空间上始终保持相对静止的关系，但电枢反应的性质取决于这两个磁动势幅值的相对位置，而这一位置与励磁电动势  $\dot{E}_0$  和电枢电流  $\dot{I}$  之间的相位差，即角度  $\psi$  有关，角  $\psi$  由决定于负载的性质。当  $\dot{E}_0$  与  $\dot{I}$  同相时， $\psi = 0^\circ$ ，电枢反应为交轴电枢反应，交轴电枢反应使气隙合成磁场幅值增加，而其轴线从主极轴线逆转子转向后移一个锐角。当  $\dot{I}$  滞后  $\dot{E}_0$   $90^\circ$  时，电枢反应为直轴电枢反应，其性质完全是去磁的。当  $\dot{I}$  超前  $\dot{E}_0$   $90^\circ$  时，也为直轴电枢反应，其性质完全是助磁的。一般情况下， $0^\circ < \psi < 90^\circ$ ，此时的电枢反应兼有直轴去磁作用和交磁作用。

4、试述直轴和交轴同步电抗的意义？如何用试验方法来测定？

答 在凸极同步电机中，由于气隙不均匀为了计算方便，将电枢磁动势  $F_a$  分解为  $F_{ad}$  和  $F_{aq}$ ，分别除以直轴磁阻和交轴磁阻，可得到  $\Phi_{ad}$  和  $\Phi_{aq}$ ，它们分别在定子绕组感应电动势  $E_{ad}$  和  $E_{aq}$ ，写成电抗压降形式，即

$$\dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_d X_{ad} \quad , \quad \dot{E}_{aq} = -j\dot{I}_q X_{aq}$$

和分别称为直轴电枢反应电抗和交轴电枢反应电抗，它们分别反映出上述直轴和

记者电枢反应磁通的强弱。

直轴同步电抗为  $X_d = X_{ad} + X_\sigma$

交轴同步电抗为  $X_q = X_{aq} + X_\sigma$

$X_d$  和  $X_q$  表征了当对称三相直轴或交轴电流每相为1A时，三相总磁场在电枢绕组中每相感应的电动势。利用空载和短路特性可测定的  $X_d$  不饱和值；利用空载和零功率因数负载特性可测定  $X_d$  的饱和值；利用转差法可测定  $X_d$  和  $X_q$  的不饱和值。

5、凸极同步电机中，为什么直轴电枢反应电抗  $X_{ad}$  大于交轴电枢反应电抗  $X_{aq}$  ？

答 在凸极电机中沿电枢圆周的气隙是很不均匀的，分析其电枢反应时，要用双反应理论，即把电枢反应磁动势分解成垂直和平行于电动势  $\dot{E}_0$  的两个分量  $\vec{F}_{ad}$  和  $\vec{F}_{aq}$ ，它们分别产生直轴电枢反应磁通  $\Phi_{ad}$  和交轴电枢反应磁通  $\Phi_{aq}$ ，相应的电流也分解成两个分量。因此  $I_d \propto F_{ad} \propto \Phi_{ad} \propto E_{ad}$  或  $E_{ad} = I_d X_{ad}$ ，

$$X_d = E_{ad} / I_d$$

$$I_q \propto F_{aq} \propto \Phi_{aq} \propto E_{aq} \quad \text{或} \quad E_{aq} = I_q X_{aq}, \quad X_q = E_{aq} / I_q$$

由于直轴磁路的磁导比交轴磁路的磁导要大得多，同样大小的电流产生的磁通和相应的电动势也大得多，所以电抗  $X_{ad} > X_{aq}$ 。

6、为什么同步发电机的短路特性是一条直线？

答 同步发电机稳态短路时，电枢磁动势基本上是一个纯去磁作用的直轴磁动势，气隙合成磁动势为  $F'_\delta = F_f - F'_{ad}$ ，合成电动势为  $\dot{E}_\delta \approx jI X_\sigma$ ，即合成电动势只等于漏抗压降。所以其对应的气隙合成磁通很小，电机的磁路处于不饱和状态，由于气隙合成磁动势  $F'_\delta \propto E_\delta \propto I$ ，而  $F'_{ad} = k_{ad} F_{ad} \propto I$ ，所以励磁磁动势  $F_f = F'_\delta + F'_{ad}$  必然正比于  $I$ ，故短路特性  $I_k = f(I_f)$  是一条直线。

7、为什么从空载特性和短路特性不能测定交轴同步电抗？为什么从空载特性和短路特性不能准确测定直轴同步电抗？

答 凸极同步发电机的电动势方程式为

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}R_a + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q$$

三相短路时  $U = 0$ ，由于发电机的电枢电阻远小于同步电抗，短路电流可认为是纯感性的，即  $\psi = 90^\circ$ ， $I_q = 0$ ， $I = I_d$ ， $\dot{E}_0 = j\dot{I}_d X_d = j\dot{I}X_d$ ，所以由空载特性测出  $E_0$  和短路特性测出  $I$  可求出直轴同步电抗  $X_d$ 。由于短路情况下电枢磁动势基本上是一个纯去磁作用的直轴磁动势，使气隙合成磁动势很小，对应的气隙合成磁通很小，电机磁路处于不饱和状态，这时求出的是  $X_d$  的不饱和值。由于  $I_q = 0$ ，不能从空载和短路特性求出  $X_q$ 。

8、在直流电机中， $E > U$  还是  $E < U$  是判断电机作为发电机运行还是电动机运行的依据之一，在同步电机中，这个结论还正确吗？

答 在同步电机中，励磁电动势  $\dot{E}_0$  和电机端电压  $\dot{U}$  都是电压相量，不能根据它们的大小来判断电机的运行状态，而应该根据气隙合成磁场轴线与主磁极轴线的相对位置来决定。当主磁极场轴线超前合成磁场轴线时，为发电机状态；重合时为调相机状态；滞后时为电动机状态。

9、什么是同步电机的功角特性？ $\theta$  角有什么意义？

答 当电网电压  $U$  和频率  $f$  恒定，参数  $X_d$  和  $X_q$  为常数、励磁电动势  $E_0$  不变时，同步电机的电磁功率只决定于  $\dot{E}_0$  与  $\dot{U}$  的夹角  $\theta$ ， $\theta$  称为功率角， $P_{em} = f(\theta)$  为同步电机的功角特性。

由于电机的漏阻抗远小于同步电抗，从空间上看，功率角  $\theta$  可近似认为为主磁极轴线与气隙合成磁场轴线之间的夹角；从时间上，功率角  $\theta$  励磁电动势  $\dot{E}_0$  与电压  $\dot{U}$  之间的夹角。

10、同步电机转子表面气隙磁通密度分布的波形是怎样的？转子表面某一点的气隙磁通密度大小随时间变化吗？定子表面某一点的气隙磁通密度随时间变化吗？

答：凸极同步电机转子表面气隙磁通密度分布的波形接近于正弦波，其中含有一系列奇数次谐波；隐极同步电机转子表面气隙磁通密度分布的波形是接近正弦的阶梯状波，其中也含有一系列奇数次谐波。

转子表面某一点的气隙磁通密度大小不随时间变化（电枢电流为零时），但由于转子是旋转的，因此定子表面某一点的气隙磁通密度是随时间变化的。

## 直流电机的原理与结构

### 习题与思考题

1、换向器和电刷在直流电动机和直流发电机中分别起什么作用？

答：（1）对直流电动机而言，电刷和换向器起到了由外部电源直流到内部绕组交流的转换作用，即相当于一个机械式逆变器；

（2）对直流发电机而言，电刷和换向器起到了由内部绕组交流到外部电源直流的转换作用，即相当于一个机械式整流器。

2、单叠绕组和单波绕组的联接规律有什么不同？为什么单叠绕组的并联支路对数  $a=p$ ，而单波绕组的并联支路对数  $a=1$ ？

单叠绕组联结规律：

（1）同一元件的两个出线端分别接至相邻的换向片上；

（2）相邻的两个元件接至相邻的换向片上。

单波绕组联结规律：

把上层边同一类型磁极下（N 极或 S 极）的元件通过换向片依次相连构成支路

3、在直流发电机和直流电动机中，电磁转矩和电枢旋转方向的关系有何不同？电枢电势和电枢电流方向的关系有何不同？怎样判别直流电机是运行于发电机状态还是运行于电动机状态？

答：直流发电机：电磁转矩和电枢旋转方向相反，电枢感应电动势和电枢电流方向相同；

直流电动机：电磁转矩和电枢旋转方向相同，电枢感应电动势和电枢电流方向相反；

运行时直流电机的感应电动势大于电枢端电压为发电运行状态；感应电动势小于电枢端电压为电动运行状态。

4、什么叫电枢反应？电枢反应的性质与哪些因素有关？一般情况下，发电机的电枢反应性质是什么？电动机呢？

答：直流电机在空载运行时，气隙磁场仅有励磁磁动势产生，而负载运作时，气隙磁场是由励磁磁动势和电枢磁动势共同产生的，显然与空载时不同，因此把电枢磁动势对主极磁场的影响称为电枢反应。

1. 电刷在几何中性线时均产生交轴电枢反应；其结果（1）均使磁场发生畸变，物理中性线偏移（但偏移方向不同，见不同点）；（2）去磁（磁场饱和的话），使气隙磁场削弱。



2. 电刷不在几何中性线时, 除均产生交轴电枢反应(其结果与上同)外, 还产生直轴电枢反应, 其结果是去磁还是助磁, 这与发电机还是电动机以及电刷偏移方向有关。

不同点:

①交轴电枢反应使磁场畸变, 物理中性线偏移, 对发电机: 顺转向偏, 电动机: 逆转向偏。

②直轴电枢反应

	电刷顺转向偏	电刷逆转向偏
发电机	去磁	助磁
电动机	助磁	去磁

电枢反应结果可能使气隙磁场畸变, 同时还可能使气隙磁场削弱或增强。

5、直流电机的感应电动势与哪些因素有关? 若一台直流发电机在额定转速下的空载电动势为 230V (等于额定电压), 试问在下列情况下电动势变为多少? (1) 磁通减少 10% ; (2) 励磁电流减少 10% ; (3) 转速增加 20%; (4) 磁通减少 10%。

答 感应电动势  $E = C_e \Phi n \propto \Phi n$ , 在其它条件不变的情况下, 感应电动势 E 与磁通  $\Phi$  和转速 n 成正比。

- (1)  $\Phi$  减少 10% , E 亦减少 10% , 为 207V。
- (2) 励磁电流减少 10% , 由于磁路饱和,  $\Phi$  减少不到 10% , E 亦减少不到 10% , 因此  $207V < E < 230V$ 。
- (3) n 增加 20% , E 亦增加 20% , 为 276V。
- (4)  $\Phi$  减少 10% , n 上升 10% ,  $E = (1 - 0.1)(1 + 0.1) \times 230V = 228V$ 。

6、 电动机的电磁转矩是驱动转矩, 当电磁转矩增加时转速似乎应该上升。但从直流电动机的转矩及转速特性上看, 电磁转矩增加时转速反而下降, 这是什么原因?

答: 随着负载的增加, 转子转速下降。影响转子转速的因素有两个:

- (1) 电枢的电阻压降;
- (2) 电枢反应的去磁作用。

7、直流串励电机有哪些特点? 为什么电动机的机械特性是软特性? 直流串励电

动机在使用中应注意哪些问题？

串励直流电动机其特点是： $I_a = I_s = I_1$ 。机械特性的表达式如他励直流电动机

基本相同  $n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R_s}{C_e C_T \Phi^2} T_{em}$ ，当负载较轻、磁路未饱和时， $\Phi = K_f I_f$ ，因此

$$T_{em} = C_T \Phi I_a = C'_T I_a^2, \text{ 机械特性变为 } n = \frac{U_1}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R_s}{C_e C_T \Phi^2} T_{em} = \frac{U_1}{K \sqrt{T_{em}}} - \frac{R_a + R_s}{C'_e}$$

当负载较重、磁路饱和时， $\Phi$  近似不变。此时，转速随转矩的增加线性下降。

串励直流电动机不允许轻载或空载运行。

#### 8、简述并励发电机的自励建压条件及建压过程

答：并励发电机的自励建压条件：①有剩磁。②要求电枢绕组及励磁绕组接线正确。③励磁回路电阻小于其临界值。

当电机起动旋转时，电枢绕组切割主磁极下气隙中的剩磁磁场而感应一数值很小的剩磁电动势，由于励磁绕组与电枢绕组并联，因此就有一不大的励磁电流流过励磁绕组，产生一个不大的磁场，它也作用在气隙中。若它对原剩磁磁场起助磁作用，气隙磁场得以加强，致使电枢绕组感应电动势比原剩磁电动势增大，则励磁电流就进一步增大，其建立的磁场更进一步增强(即助磁作用进一步增强)，电枢电动势进一步提升，……，周而复始，经几个循环，电枢绕组便建立起电压。

9、并激直流发电机正转能自激，反转能否自激？为什么？如果反接励磁绕组，电机并以额定转速反转，这种情况能否自激建压？

答：不能自激，由于反向旋转，感应电势的方向改变，在励磁绕组中产生的励磁电流反方向，其产生的磁通方向与剩磁方向相反，将剩磁抵消。

能自激建压，电机反转，感应电势的方向改变，在励磁绕组中产生的励磁电流反方向，由于反接励磁绕组，励磁电流产生的磁通方向与剩磁方向相同，使磁通增大，感应电势越来越大，建立起电压。

10、一台 4 极并励直流发电机，电枢绕组为单叠整距绕组，每极磁通为  $\Phi = 3.5 \times 10^{-2} \text{wb}$ ，电枢总导体数  $N=152$ ，求

(1) 当  $n=1200 \text{r/min}$  时的空载电势；

(2) 设每条支路电流  $i_a=50 \text{A}$  不变，当电枢绕组为单叠和单波绕组时，电机的电磁转矩各位多少？

$$E_a = c_e \phi \bullet n = \frac{pN}{60a} \phi n = \frac{2 \times 152}{60 \times 2} \times 3.5 \times 10^{-2} \times 1200 = 106.4V$$

$$\text{单叠} T_{em} = \frac{pN}{2\pi a} \phi I_a = \frac{2 \times 152}{2 \times 3.14 \times 2} 3.5 \times 10^{-2} \times 4 \times 50 = 169Nm$$

$$\text{单波} T_{em} = \frac{pN}{2\pi a} \phi I_a = \frac{2 \times 152}{2 \times 3.14 \times 1} 3.5 \times 10^{-2} \times 2 \times 50 = 169Nm$$

11、一台并励直流电机， $2P=6$ ，每极磁通  $\Phi=8 \times 10^{-3} \text{wb}$ ，电枢总导体数  $N=520$ ，采用单波绕组  $2a=2$ ， $U_N=220V$ ， $n_N=1000 \text{r/min}$ ， $R_a=0.6 \Omega$ ， $I_f=0.5$ ， $P_0=110$ 。求额定运行时：

(1) 电势 (2) 电磁功率 (3) 电磁转矩 (4) 空载转矩 (5) 负载转矩 (6) 效率

$$E_a = c_e \phi \bullet n = \frac{pN}{60a} \phi n = \frac{2 \times 520}{60 \times 1} \times 8 \times 10^{-2} \times 1000 = 208V$$

$U_N > E_a$  直流电动机

$$I_a = \frac{U_N - E_a}{R_a} = 20$$

$$I_N = I_a + I_f = 20.5$$

$$P_{em} = E_a I_a = 4160 \text{ W}$$

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{P_{em}}{\frac{2\pi n}{60}} = 39.7 \text{ Nm}$$

$$P_2 = P_{em} - P_0 = 4050 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{4050}{220 \times 20.5} = 0.898$$

12、一台并励直流电动机在额定电压  $U_N=220$  伏和额定电流  $I_N=80$  安的情况下运行，电枢绕组电阻  $r_a=0.08 \Omega$ ， $2\Delta U_s=2$  伏，励磁绕阻的电阻  $r_f=88.8 \Omega$ ，额定负载时的效率  $\eta_N=85\%$ ，试求：

(1) 额定输入功率 (2) 额定输出功率；(3) 总损耗；(4) 励磁回路铜耗；  
(5) 电枢回路铜耗；(6) 电刷接触损耗；(7) 附加损耗；(8) 机械损耗与铁耗之和。

$$\text{额定输入功率 } P_1 = U_N I_N = 17600W$$

$$\text{额定输出功率 } P_2 = P_1 \eta = 14960W$$

$$\text{总损耗 } \Delta P = P_1 - P_2 = 2640W$$

$$\text{励磁回路铜耗 } P_{cuf} = I_f^2 R_f = \frac{U_N^2}{R_f} = 544W$$

$$I_a = I_N - I_f = 80 - 2.477 = 77.5A$$

$$\text{电枢回路铜耗 } P_{cua} = I_a^2 R_a = 480.5W$$

$$\text{电刷接触损耗 } P_{cuB} = 2\Delta U_b I_a = 155W$$

$$\text{附加损耗 } P_{ad} = 0.01P_2 = 149.6W$$

$$\text{机械损耗与铁耗之和 } P_{FE} + P_{MEC} = \Delta P - P_{cuf} - P_{cua} - P_{cuB} - P_{ad} = 1310W$$

13、一台直流并励发电机，额定功率  $P_N=82kW$ ，额定电压  $U_N=230V$ ，额定转速  $n_N=970r/min$ ，磁极数  $2p=4$ ，电枢回路总电阻(包括电刷接触电阻)  $R_a=0.026\Omega$ ，励磁回路电阻  $r_f=26.3\Omega$ 。试求

- (1) 在额定运行情况下的电磁功率；
- (2) 在额定运行情况下的电磁转矩。

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = 35.65A$$

$$I_f = \frac{U_N}{r_f} = 8.75A$$

$$I_a = I_N + I_f = 44.40A$$

$$E_a = U_N + I_a R_a = 231.2V$$

$$P_{em} = E_a I_a = 10263.3W$$

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{P_{em}}{\frac{2\pi n}{60}} = 101.2Nm$$

14、一台 Z2-61 并励直流电动机的额定数据如下： $P_N=17$  千瓦， $U_N=220$  伏， $n_N=3000$  转/分， $I_N=88.9$  安，电枢回路总电阻  $R_a=0.114\Omega$ ，励磁回路电阻  $R_f=181.5\Omega$ ，忽略电枢反应影响，求：

- (1) 电动机的额定输出转矩；(2) 在额定负载时的电磁转矩；  
 (3) 额定负载时的效率；(4) 在理想空载 ( $I_a=0$ ) 时的转速；  
 (5) 当电枢回路串入一电阻  $R \Omega = 0.15$  欧时，在额定负载转矩时的转速。

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{17}{3000} = 54.1 Nm$$

解：(1) 额定输出转矩

(2) 额定负载时电磁转矩：

$$I_f = \frac{U_N}{R_f} = \frac{220}{181.5} = 1.21 A$$

励磁电流

$$I_a = I_N - I_f = 88.9 - 1.21 = 87.7 A$$

电枢电流

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_a R_a}{n_N} = \frac{220 - 87.7 \times 0.114}{3000} = 0.07$$

$$T_{emN} = C_T \Phi_N I_a = 9.55 C_e \Phi_N I_a = 9.55 \times 0.07 \times 87.7 = 58.63 Nm$$

$$\eta = \frac{P_N}{P_1} = \frac{P_N}{U_N I_N} = \frac{17000}{220 \times 88.9} = 0.869$$

(3) 额定负载时效率

$$(4) \quad n_0 = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} = \frac{220}{0.07} = 3143 r/min$$

(5) 当电枢回路串入  $R = 0.15 \Omega$ ，在  $T_N$  时转速：

$$n = \frac{U_N - I_a (R_a + R)}{C_e \Phi_N} = \frac{220 - 87.7(0.114 + 0.15)}{0.07} = 2812 r/min$$

15、一台他励电动机数据如下：  $P_N=21$  千瓦,  $U_N=220$  伏,  $I_N=112$  安,  $n_N=950$  转/分，求

- (1) 若负载转矩为  $0.8T_N$  时，求电动机转速；  
 (2) 若负载转矩为  $0.8T_N$  时，在电枢电路中串联  $30\%R_N$  附加电阻，求电阻接入瞬间和转入新的稳态时的转速、电枢电流和电磁转矩；  
 (3) 若将电枢电压降低至额定电压的  $20\%$ ，磁通为额定磁通的  $70\%$ ，求额定负载时电机的转速。

$$(1) R_a = \frac{U_N I_N - P_N}{2 I_N^2} = 0.145 \Omega$$

$$c_e \phi = \frac{U_N - I_a R_a}{n_N} = 0.241$$

$$T = 0.8 T_N \text{ 时 } I_a = 0.8 I_N$$

$$n = \frac{U_N - I_a R_a}{c_e \phi} = \frac{220 - 0.8 \times 112 \times 0.145}{0.241} = 967.3 \text{ r/min}$$

$$(2) R = R_a + R_{ad} = 0.73$$

$$\text{电阻接入瞬间, 转速来不及变化, } n = 967.3 \text{ r/min}$$

$$I_{a2} = \frac{U_N - c_e \phi n}{R} = 17.8 \text{ A}$$

$$T = c_T \phi I_{a2} = 36.3 \text{ NM}$$

$$\text{稳态时负载转矩不变, } T = 0.8 T_N = 182.8 \text{ NM}$$

$$\text{电枢电流不变, } I_a = 0.8 I_N = 89.6 \text{ A}$$

$$\text{转速 } n = \frac{U_N - I_a R_a}{c_e \phi} = 722.4 \text{ r/min}$$

$$(3) I_a' = \frac{I_N}{0.7} - 160 \text{ A}$$

$$n = \frac{U_N - I_a R_a}{c_e \phi} = \frac{20\% U_N - I_a' R_a}{0.7 c_e \phi_N} = \frac{44 - 160 \times 0.145}{0.15} = 138.6 \text{ r/min}$$

## 直流电动机的起动、调速和制动

### 习题与思考题

1、直流电动机的起动电流决定于什么？正常工作时的电流又决定于什么？

答：起动时电枢电流大小决定于电枢电压和电枢回路电阻，而稳定状态时电枢电流  $I_a$  值决定于负载转矩大小。

2、一般他励直流电动机为什么不能直接起动？采用什么方法较好？

答：因为起动电流太大，其次不能换向，还存在极大的机械冲击。

采用降压起动和串电阻起动。

3、直流电动机拖动额定负载，若欲将转速调至高于额定转速，有哪些方法？为什么？若欲将转速调至低于额定转速，又有哪些方法？为什么？

欲将转速调至高于额定转速，采用弱磁升速方法。由于在电流较小的励磁回路中进行调节，因而控制方便，能量损耗小，设备简单，调速平滑性好。弱磁升速后电枢电流增大，电动机的输入功率增大，但由于转速升高，输出功率也增大，电动机的效率基本不变，因此经济性是比较好。

欲将转速调至低于额定转速，可以采用电枢回路串电阻降压降速和降低电枢电压降速。

若采用电枢回路串电阻降压降速，该调速方法有以下的特点：

①方向只能是从基速向下调。

②调速时，所串的调速电阻上通过很大的电枢电流，会产生很大的损耗，转速越低，损耗越大。

采用降低电源电压降压降速，其特点：

①方向只能是从基速向下调。

②调速时，所串的调速电阻上通过很大的电枢电流，会产生很大的损耗，转速越低，损耗越大。采用电源电压能够平滑调节，可实现无级调速。调速前后的机械特性的斜率不变，硬度较高，负载变化时稳定性好。

4、哪些调速方法属于恒功率调速？哪些调速方法属于恒转矩调速？

答：恒功率调速是指保持电枢电流不变，电磁功率不变，改变磁通调速属于恒功率调速。

恒转矩调速是指保持电枢电流不变，电磁转矩不变，降压和串电阻调速属于恒转矩调速。

5、何谓制动工作状态？直流电动机的制动工作状态有几种形式？各有何特点？

答：直流电动机的制动工作状态是电磁转矩  $T_{em}$  与转速  $n$  方向相反的一种运行状态。

能耗制动是指将机械轴上的动能或势能转换而来的电能通过电枢回路的外串电阻发热消耗掉的一种制动方式。

反接制动是指外加电枢电压反向或电枢电势在外部条件作用下反向的一种制动方式。其又分为电枢反接的反接制动和转速反向的反接制动。

电枢反接的反接制动对于反抗性类负载，把外加电源反接，同时在电枢回路中串入限流的反接制动电阻，便可实现反接制动。反接制动时的制动电阻决定了制动转矩的大小。

转速反向的反接制动机械特性曲线就是电动状态时电枢串电阻时的人为特性在第四象限的部分。

回馈制动是电机的实际转速超过理想空载转速的运行状态。在这种运行状态下，电机处于发电制动状态，故回馈制动又称为再生制动。

回馈制动时电机的接线同电动机运行状态完全相同，其机械特性的表达式也完全相同。所不同的是：电机的实际转速超过理想空载转速，导致外加电压低于感应反电势，即：  $U_1 < E_a$ 。

6、一台他励直流电动机的铭牌数据为： $P_N = 22\text{Kw}$ ,  $U_N = 220\text{V}$ ,  $I_N = 115\text{A}$ ,  $n_N = 1500\text{r/min}$ ，已知  $R_a = 0.1\ \Omega$ 。当电动机拖动额定恒转矩负载  $T_L = T_N$  运行，要求把转速降低到  $1000\text{r/min}$ ，不计电动机的空载转矩。试计算：（1）采用电枢串电阻调速时需串入的电阻值。（2）采用降低电源电压调速时需将电源电压降低到多少伏？

$$\text{解：（1） } c_e \phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 115 \times 0.1}{1500} = 0.139$$

$$R_{ad} = \frac{U_N - c_e \phi_N \cdot n'}{I_N} - R_a = \frac{220 - 0.139 \times 1000}{115} - 0.1 = 0.604$$

$$(2) U = c_e \phi_N \cdot n' + I_N R_a = 0.139 \times 1000 + 115 \times 0.1 = 150.5\text{V}$$

7、他励直流电动机的数据为： $P_N = 29\text{千瓦}$ ， $U_N = 440\text{伏}$ ， $I_N = 76.2\text{安}$ ， $n_N = 1050\text{转/分}$ ， $R_a = 0.068\ \Omega$ 。

（1）电动机在回馈制动下工作，设  $I_a = 60\text{安}$ ，电枢电路不串电阻，求电机的转速；

（2）电动机在能耗制动下工作，转速  $n = 500\text{转/分}$ ，电枢电流为额定值，求电枢电路内串接电阻值和电机轴上的转矩；



(3) 电动机在转速反向的反接制动下工作，转速  $n=-600$  转/分，电枢电流  $I_a=50$  安，求电枢电路内的串接电阻、电机轴上的转矩、电网供给的功率、从轴上输入的功率、在电枢电路内的电阻上消耗功率。

$$(1) \quad c_e \phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{440 - 76.2 \times 0.068}{1050} = 0.39$$

$$n = \frac{-U_N}{c_e \phi_N} - \frac{R_a}{c_e \phi} I = -\frac{440}{0.39} - \frac{60 \times 0.068}{0.39} = -1138 r/m$$

$$(2) \quad R_{ad1} = \frac{0 - c_e \phi_N \bullet n'}{I_N} - R_a = \frac{-0.39 \times (-500)}{60} - 0.068 = 3.182 \Omega$$

$$T_N = \frac{P_N}{\Omega} = \frac{P_N}{\frac{2\pi n}{60}} = \frac{29000 \times 60}{2\pi \times 1050} = 283.9 Nm$$

$$(3) \quad R_{ad2} = \frac{-U_N - c_e \phi_N \bullet n'}{I_N} - R_a = \frac{-440 - 0.39 \bullet (-600)}{50} - 0.068 = 13.2 \Omega$$

$$P_1 = U_N I_a = 440 \times 50 = 22 KW$$

$$T_2 = T_N \frac{I_a}{I_{aN}} = 173.2 Nm$$

$$P_2 = T_2 \Omega = 173.2 \times \frac{2 \times 3.14 \times (-600)}{60} = -10.88 KW$$

8、一台他励直流电动机，额定数据为  $P_N=17kw$ ,  $U_N=110V$ ,  $I_N=185A$ ,  $n_N=1000r/min$ ，已知电动机最大允许电流  $I_{amax}=1.8I_N$ ，电动机拖动  $T_L=0.8T_N$ ，负载作电动运行，求：

(1) 若采用能耗制动停车，电枢应串入多大电阻？

(2) 若采用反接制动停车，电枢应串入多大电阻？

(3) 两种制动方法在制动到  $n=0$  时的电磁转矩各是多大？

解：

$$R_a = \frac{1}{2} \bullet \frac{U_N I_N - P_N}{I_N^2} = 0.049$$

$$1) \quad c_e \phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{110 - 185 \times 0.049}{1000} = 0.1$$

$$n_1 = \frac{U_N - I_a' R_a}{c_e \phi_N} = \frac{110 - 0.8 \times 185 \times 0.049}{0.1} = 1028 \text{ r/m}$$

$$R_{ad1} = \frac{0 - c_e \phi_N \bullet n_1}{I_{\max}} - R_a = \frac{-0.1 \times 1028}{-1.8 I_N} - 0.049$$

$$= 0.026 \Omega$$

$$(2) \quad R_{ad2} = \frac{-U_N - c_e \phi_N \bullet n'}{I_{\max}} - R_a = \frac{-220 - 0.1 \bullet 1028}{-1.8 I_N} - 0.049$$

$$= 0.59 \Omega$$

$$T_2 = -1.8 T_N = -1.8 \times \frac{P_N \times 60}{2 \pi n} = -292.23 \text{ Nm}$$

$$(3) \quad I_a' = -\frac{U_N}{R_a + R_{ad2}} = -204 \text{ A}$$

$$T_2 = -1.8 T_N = -1.8 \times 9.55 c_e \phi_N I_a' = -167 \text{ Nm}$$